

Montes¹⁰¹

REVISTA DE ÁMBITO FORESTAL

Número

2.º Trimestre 2010

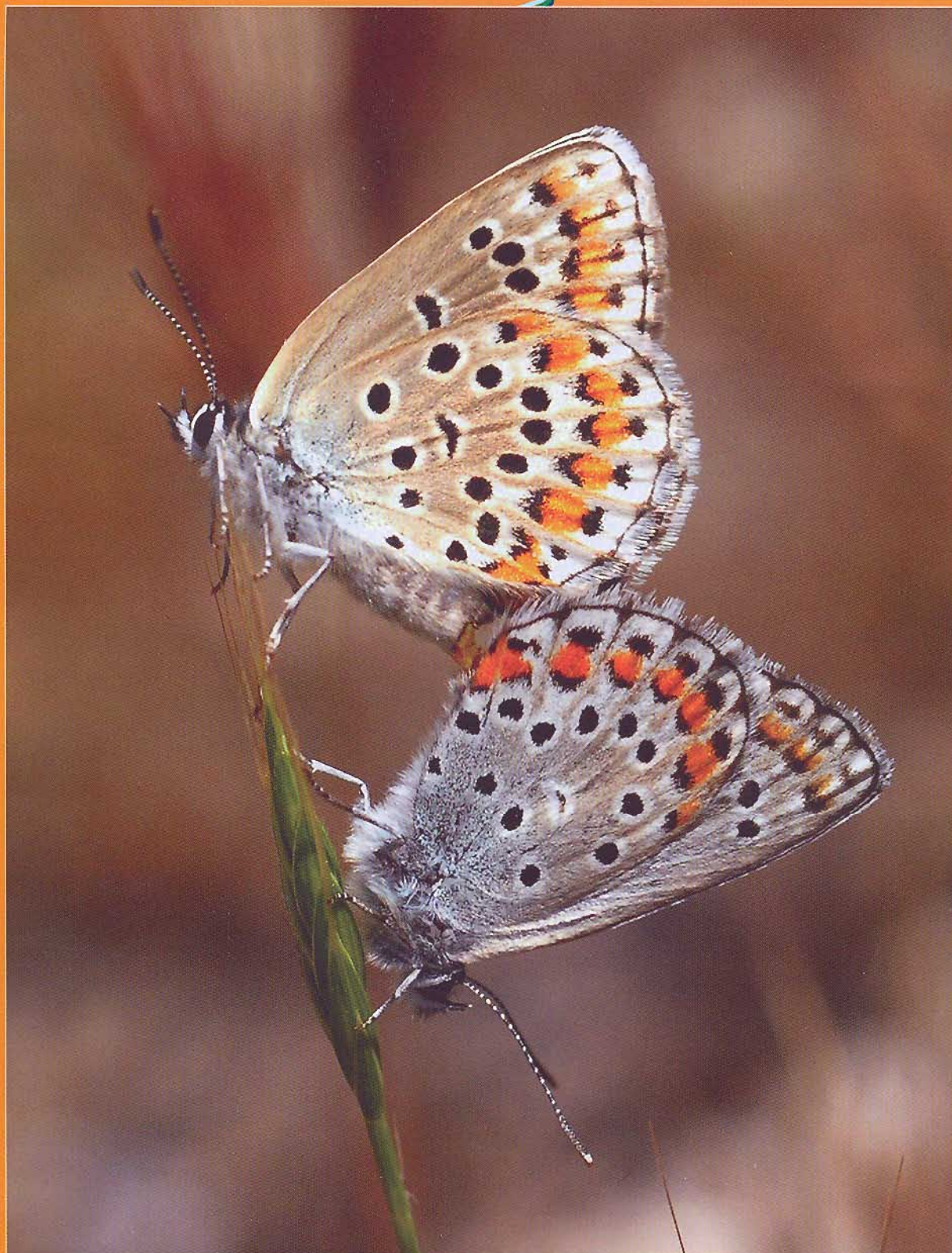




Figura 1.- Vista frontal del secador solar experimental



Vista lateral con detalle del colector solar

Supervisión multidistribuida de un secadero solar de madera empleando sensores de bajo coste

E. Juliá¹, P. Barreiro², B. Diezma²,
J. Bonzon¹, J. I. Robla³, E. C. Correa²,
O. Escalona¹, J. García-Hierro³ y F. J. Arranz²

¹ Laboratorio de Energías Renovables.

Universidad de Oriente. Santiago de Cuba

² Dpto. Ingeniería Rural. Universidad Politécnica de Madrid. España

³ Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas. CSIC. España

RESUMEN

Se ha llevado a cabo la supervisión multidistribuida de un secadero solar de madera mediante la implementación de sensores de bajo coste. La toma de datos se ha realizado en un secadero experimental de 0,3 m³. La sensórica empleada, consistente básicamente en termopares y módulos SENSIRION™, junto con el modelo psicrométrico definido por ASABE, ha permitido estimar la cantidad de agua extraída de la madera a lo largo del proceso de secado. La supervisión continua del proceso posibilita la implementación de sistemas automáticos de control del secadero mediante la regulación de la velocidad del ventilador y la proporción de aire sujeto a recirculación.

INTRODUCCIÓN

En el proceso industrial maderero, el 80% del consumo energético corresponde a la operación de secado (REEB, 1997). El secado artificial se puede realizar utilizando diferentes procedimientos, el más común es el empleo de hornos que utilizan aire caliente y combustibles fósiles. Algunos países industrializados disponen de tecnologías más eficientes (secado al vacío, por alta frecuencia, y otras) pero su coste las hace aún inalcanzables para muchos países en vías de desarrollo (PLUMPTRE, 1996).

Ya desde comienzos de los años 90 del siglo XX diversos países (desarrollados y en vía de desarrollo) han comenzado a emplear radiación solar para el calentamiento del aire de los secaderos (SATTAR, 1993). La principal limitación de la energía solar está vinculada a su disponibilidad, pues según la latitud, la densidad de la radiación solar es mayor o menor por lo que para algunos países, como los que se encuentran en la franja inter-tropical, resulta más ventajoso el uso de esta fuente de energía. Cuba, lugar donde se desarrollan los trabajos experimentales de esta investigación, está situada en una zona privilegiada desde la perspectiva del aprovechamiento de la energía solar, ya que recibe anualmente como promedio 5 kW por hora sobre cada m² de su superficie (BÉRRIZ y DEAS, 1990). Con la cantidad de energía que se puede obtener por esa vía sería posible secar toda la madera que se procesa actualmente en el país si existieran las instalaciones necesarias.

JANKOWSKY et al. (2006) publicaron una revisión sobre el secado de madera referida a Brasil, que abarca un periodo de 20 años (1984-2004). En dicho estudio se indica que las investigaciones realizadas en esos cuatro lustros refieren a trabajos fundamentalmente experimentales cuyos resultados han sido generalmente publicados a nivel nacional. Esta parece ser también la tónica en otros países iberoamericanos dado que los trabajos de investigación se recogen mayoritariamente en las actas de congresos: IUFRO (International Union of Forest Research Organizations), IWDC (The 8th International Conference on Distributed Computing and Networking

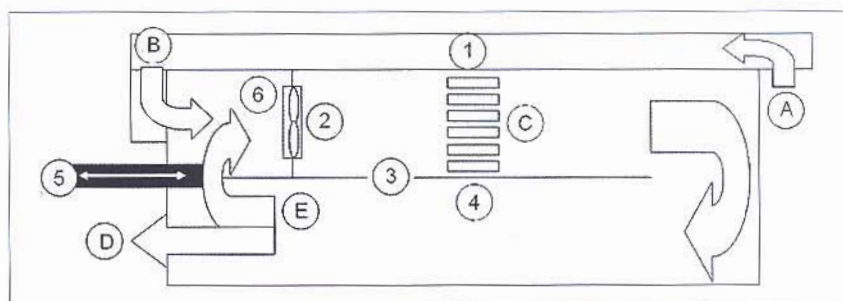


Figura 2.- Esquema del secador solar con indicaciones de los elementos constitutivos (números), y de los trasiegos del aire (letras)

(ICDCN 2006), o bien en revistas técnicas de lengua castellana como «Maderas. Ciencia y Tecnología» y «ASADES».

Los trabajos mencionados pueden clasificarse según su carácter eminentemente experimental o fundamental. Entre los primeros se recogen estudios relacionados con el secado convectivo (ANANIAS y VENEGAS, 2005; PÉREZ y cols., 2005; GHABA, 2007), con el secado mediante vacío (ANANIAS, 2005), o bien mediante microondas (LEIKER y AURICH, 2003).

Entre los trabajos dedicados a la modelización del secado destacan aquellos que abordan el secado convectivo (DEDIC, 2001), el secado solar (BENTAYEB y cols., 2008), la simulación de los colectores solares (ABU-HAMDEH, 2003; BISTONI, 2003), y el control de flujo y el análisis del estado transitorio en dichos colectores (ITO y COSS, 2006).

Existen asimismo algunos trabajos dedicados a la evaluación experimental de la calidad de la madera (AGUILERA, 2007).

De todo lo anterior parece deducirse que existe un margen real de mejora de los procesos de secado siendo la **energía solar térmica** un aporte energético significativo, especialmente en zonas de elevada radiación solar directa. Resulta asimismo imprescindible supervisar adecuadamente y de forma **multidistribuida** el producto, de manera que los sistemas de control ambiental dentro del secadero sean susceptibles de ser optimizados.

Parámetros a supervisar

Los parámetros ambientales decisivos en la supervisión del secado de la madera son la temperatura, la hume-

dad relativa y la velocidad del aire.

Los rangos de temperatura empleados en el secado industrial de madera mediante energía solar se clasifican en bajos (hasta 60-65 °C) y medios (80-90 °C). El primero se emplea con colectores solares planos, mientras que los segundos se utilizan con concentradores solares. Estos últimos pueden alcanzar temperaturas superiores a los primeros aunque precisan sistemas de seguimiento de la trayectoria del sol que encarecen la instalación. Por otra parte, el secado de madera a alta temperatura (> 100 °C) y ultra alta temperatura (> 150 °C) demanda otros requerimientos de las instalaciones que las hacen más caras. Las altas temperaturas pueden causar daños irreparables en la madera si no se controlan adecuadamente los otros parámetros del proceso (JANKOWSKY, 2006). También las bajas temperaturas pueden causar la destrucción de la madera por la aparición de los hongos que la pudren (REEB, 1997).

Los rangos de velocidades de aire empleados son muy estrechos y oscilan entre 0,5 -0,8 y 1,0- 1,2 m/s. pudiendo estar entre 1 y 5 m/s en el caso de secaderos de grandes dimensiones, generalmente convencionales (JANKOWSKY, 2006). Las bajas velocidades del aire favorecen la aparición de hongos ya que dificultan la extracción de la humedad superficial, mientras que las altas velocidades provocan la extracción acelerada de la humedad superficial, lo que favorece la aparición de tensiones superficiales que provocan la deformación de la madera, a veces irreparables. Para la determinación de la velocidad de rotación adecuada del ventilador para unas condiciones dadas se realizan estudios con el empleo de senso-

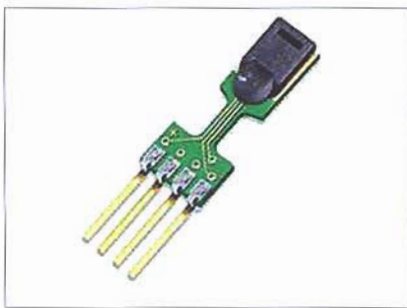


Figura 3.- Sensor SENSIRION™



Figura 4.- Sensor de conductancia para la determinación de la velocidad de aire

res de velocidad como los de hilo caliente, muy compactos y precisos.

El control de la humedad relativa no deja de ser menos importante. Valores altos de humedad relativa propios de zonas tropicales dificultan el proceso de secado ya que en esas condiciones el aire es prácticamente incapaz de extraer humedad de la madera. El conocimiento de los fundamentos de la psicrometría del aire es fundamental para calcular

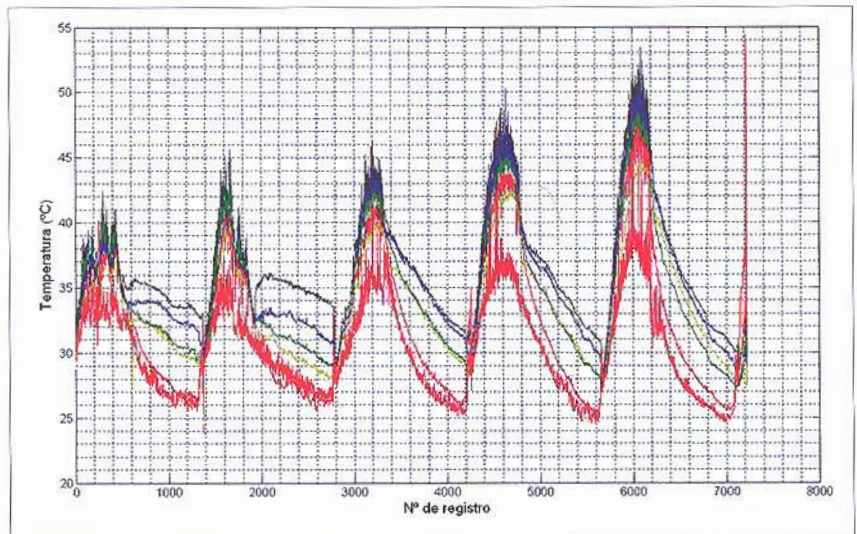


Figura 6.- Sucesión de temperaturas registradas por los diferentes sensores a lo largo de un ciclo de secado de 5 días de duración

la capacidad de éste de extraer el agua de la madera de forma eficiente. El modelo psicrométrico ASABE permite el cómputo y seguimiento detallado del proceso de secado (ASAE D272.1, ASABE 2006).

Estos tres parámetros fundamentales no pueden ser considerados independientemente uno del otro porque guardan una estrecha relación con la calidad óptima del producto final del proceso de secado de la madera.

El control de secado de la madera en los secaderos que utilizan una fuente de energía convencional (gasoil, electricidad, etc.) se realiza mediante la regulación del suministro de calor generado a partir de la fuente de energía, de manera que el

tiempo de secado puede determinarse fácilmente. Sin embargo, en los secaderos solares, al funcionar estos mediante el aprovechamiento de la energía proveniente de la radiación solar, que presenta la característica de ser inestable e impredecible, resulta más difícil controlar la temperatura y por tanto conocer el tiempo de secado. Es por eso que el sistema de control resulta más complejo.

Por todo ello, el control de los secaderos solares ha de realizarse de forma continua en relación con las condiciones ambientales exteriores e interiores de la madera. En este trabajo se han instalado en una instalación experimental una batería de sensores ambientales de alta fiabilidad y bajo coste.

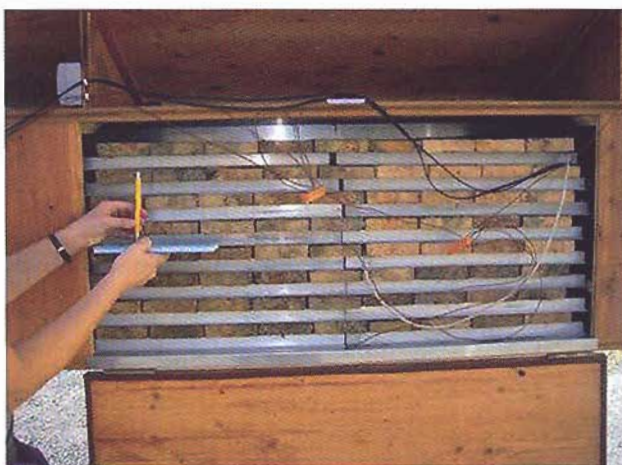


Figura 5.- Imagen de la distribución de las tablas de madera en el interior del secadero y detalle de los espacios entre ellas

OBJETIVOS

La **Universidad Politécnica de Madrid** y la **Universidad de Oriente** se encuentran desarrollando un proyecto de investigación conjunto, financiado por la Agencia Española para la Cooperación Internacional y el Desarrollo (AECID). Este proyecto plantea la viabilidad e interés de supervisar secaderos solares de madera de forma multidistribuida empleando para ello sensores de bajo coste.

En este trabajo se presentan algunos de los objetivos integrados en el proyecto:

- Integración multidistribuida de sensores de temperatura y humedad relativa de bajo coste y alta fiabilidad
- Supervisión de los parámetros ambientales del secadero en una planta piloto

METODOLOGÍA

Instalación de secado

El secadero solar (Figura 1) empleado es en la actualidad una **instalación experimental** (0,3 m³ de capacidad) cuyo esquema se incluye en la Figura 2, donde los números indican los distintos elementos: colector solar (1), ventilador (2), elemento divisor del flujo de aire (3), cámara de secado (4), compuerta de regulación de la recirculación (5) y zona de mezcla o plenum (6). Por otra parte en dicho esquema las letras se refieren a los distintos movimientos o trasiegos de aire: A es la entrada de aire desde el exterior; B es la salida del aire del colector; C es el conjunto de ranuras dispuestas entre las maderas a modo de canales para el paso del flujo de aire; D es la salida de aire al exterior; y E es la porción de aire de recirculación en el interior del secadero. Este último factor se regula mediante la posición de una trampilla de sección de paso variable que permite mayor o menor caudal de aire de recirculación.

Sensórica

La sensórica instalada en el prototipo experimental se describe a continuación: termopares tipo T, sensores SENSIRION TM (para la determinación de temperatura, humedad relativa y humedad absoluta) y

prototipos de sensores de velocidad del aire y capacitivos, de reciente desarrollo, para la determinación de la humedad de la madera.

La compañía sueca Sensirion fabrica diferentes modelos de **sensores de temperatura y humedad relativa** de bajo coste (inferior a 20 euros/unidad) y alta fiabilidad. Estos sensores se caracterizan por poseer dimensiones muy pequeñas. Están compuestos por tres zonas: la cabe-

za (donde se encuentra el sensor propiamente dicho), los terminales y un puente que une la cabeza con los terminales. El puente es la zona más estrecha y débil, lo que los hace muy frágiles; por ello hay que manipularlos con mucho cuidado. La función del puente es disminuir al máximo la conducción de calor y el tiempo de respuesta. La conexión del sensor con el circuito que envía los datos al ordenador se realiza me-

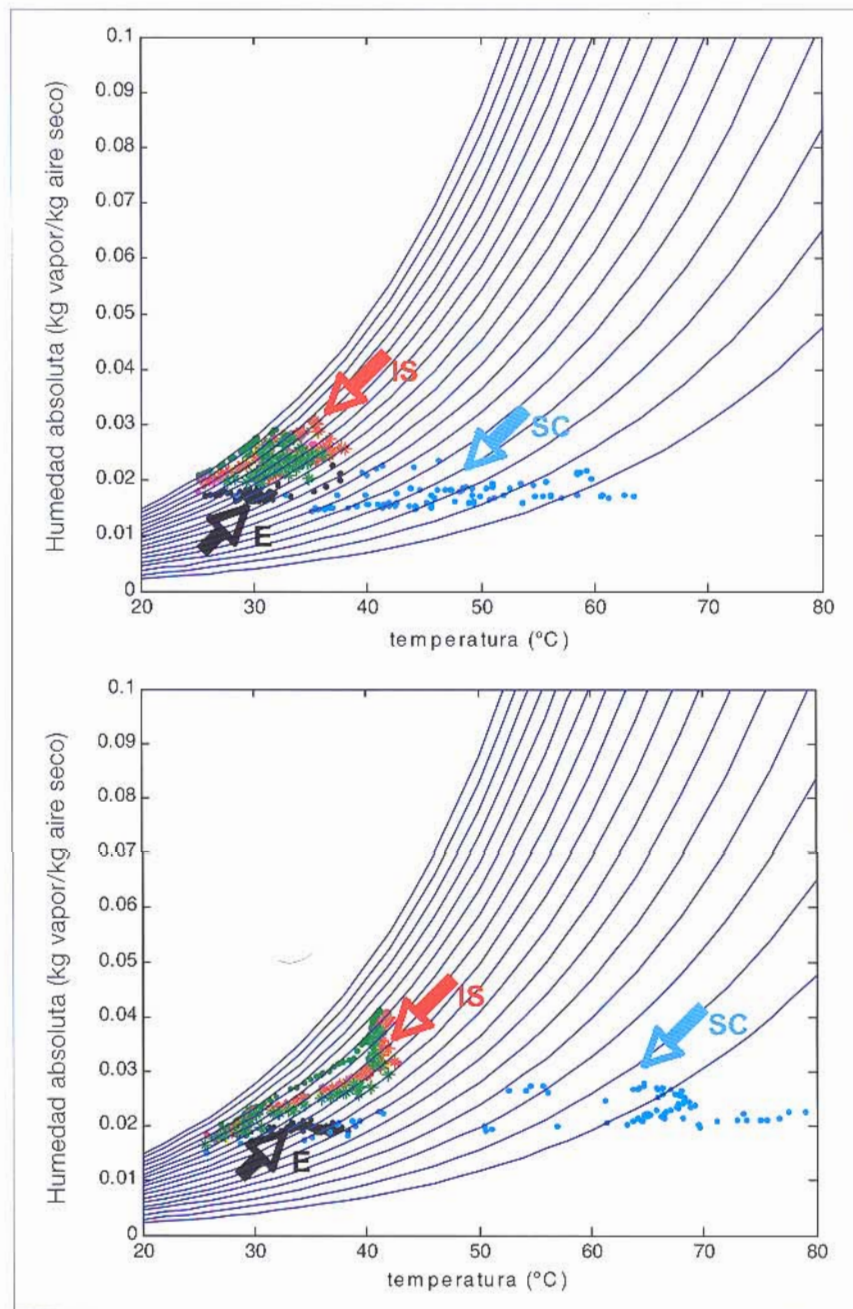


Figura 7.- Evolución ambiental a lo largo de dos días de trabajo donde se refleja la evolución diaria de la temperatura y humedad en el interior del secadero. E: entrada del aire al colector, SC: salida del colector, IS: interior del secadero

diente los cuatro terminales ubicados en el extremo opuesto al sensor (Figura 3). El rango de medida de la humedad relativa es de 0 a 100%, mientras que el de la temperatura es de -40° hasta $123,8^{\circ}\text{C}$, por lo que se adaptan a las condiciones esperables en el secador. Para utilizarlos se construyó un circuito que es el encargado de adquirir los datos y almacenarlos en el ordenador. El circuito está formado básicamente por dos microprocesadores, resistencias y condensadores, y permite la conexión de hasta ocho sensores.

Como **sensores de velocidad de aire** se ha implementado un dispositivo recientemente patentado y de sumo interés. El dispositivo se basa en un sensor de conductancia de capa límite y de velocidad de viento (BAILLE y cols., 2003; BAILLE y cols., 2006). Este sensor ha sido diseñado para medir la conductancia de capa límite de una superficie plana (disco, Figura 4) y deducir la velocidad de aire dentro de un espacio cerrado o poco ventilado (vernaderos, granjas, cámaras de cultivo, cámaras frigoríficas...). El conocimiento de estas dos variables, relacionadas con la in-

tensidad de los intercambios en la superficie de un cuerpo (planta, animal, ser humano), permite precisar su balance de energía, así como su estado de estrés fisiológico, en un medio ambiente determinado. El sensor tiene interés en todo lo que se refiere al control de los sistemas de climatización, y en particular, en lo relativo a la ventilación de locales o espacios cerrados. La señal analógica del sensor permite su tratamiento y su integración en sistemas de regulación del clima y del ambiente.

Un procedimiento alternativo al gravimétrico (destrutivo y lento) es el procedimiento eléctrico, que aprovecha alguna de las propiedades eléctricas de la madera, entre las cuales podemos citar la resistencia eléctrica o la capacitancia. Los métodos eléctricos pueden ser portátiles o de mesa. Este método solo proporciona resultados fiables para contenidos de humedad entre 7 y 30%. Permiten el seguimiento en continuo durante el proceso de secado industrial.

En este trabajo se implementan métodos eléctricos de bajo coste, dado que los rangos a determinar se encuentran dentro de los recomen-

dados para esta técnica.

El secadero experimental instrumentado con la sensórica descrita se ha empleado sistemáticamente en el periodo comprendido entre febrero y octubre de 2008. Los ciclos de secado se han seguido con cargas completas compuestas por tablas de 1 pulgada de espesor dispuestas en 8 alturas soportadas por separadores que configuran los canales para la circulación del aire (Figura 5).

Los sensores de humedad y temperatura, en los que se centran los resultados presentados en este trabajo, se han dispuesto en los siguientes puntos del secadero: a la entrada del colector (punto A en la Figura 2); a la salida del colector (B); en los espacios entre las capas de madera (C) y en la salida del secadero (D).

Para el procesado y análisis sistemático de los datos generados en los numerosos experimentos de secado de madera realizados, se ha desarrollado una serie de funciones y rutinas de Matlab.

La humedad de la madera se fue controlando después de cada día de secado mediante la pesada de 4 tablas situadas en diferentes alturas en



Expobioenergía 2010

27.28.29/10/2010
Valladolid. Spain.

¡RESERVE
YA SU
STAND!

5ª FERIA TECNOLÓGICA EN BIOENERGÍA,
LÍDER MUNDIAL.

La elección más inteligente.

ORGANIZA:



PATROCINA:



la cámara de secado. La pérdida de peso, atribuida únicamente a pérdida de humedad, se generalizaba al resto de la carga del secadero. El total de las tablas se medía antes y después del ciclo de secado completo.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En la Figura 6 se muestra un histórico de temperaturas registradas por los diferentes sensores a lo largo de un ciclo de secado de 5 días, en el cual la carga de madera estuvo compuesta por 110 tablas con un peso inicial de 102,2 kg. Al cabo de los cinco días presentó un peso final de 82,2 kg, lo que supone la extracción de 20 kg de agua. Más del 53% de las tablas experimentaron una pérdida de peso superior a los 100 g. Al término del proceso de secado, el 63% de las tablas presentaba un contenido de humedad por encima del 20%, mientras que un 35% presentaba un contenido de humedad entre 18 y 20%, y el resto se encontraba prácticamente seca (16-17% de humedad). Estos resultados permiten indicar la viabilidad del pro-

cedimiento y de la instalación para el fin perseguido, así como la necesidad de optimizarlo.

La aplicación del modelo psicrométrico de ASABE a los datos recogidos por los sensores de humedad y temperatura, permite realizar un detallado seguimiento del proceso de secado, tal y como se refleja en la Figura 7, para el primer y el último día de secado (figuras superior e inferior respectivamente). Se observa un importante calentamiento del aire sin aumento de humedad a su paso por el colector, y el enfriamiento del mismo con aumento de humedad tras su circulación por el interior de la cámara de secado. Durante el primer día se alcanza saturación en el interior del secador. Al final del proceso se observan mayores temperaturas a la salida del colector solar (puntos azules), lo que indica mayor radiación solar, así como el efecto de regulación de la trampilla de recirculación.

Asimismo, se ha elaborado un procedimiento para la estimación del agua extraída de la madera durante cada día de trabajo a partir de los datos de humedad de 2 sensores, uno a

la entrada y otro a la salida del secador. Se considera que la diferencia de humedad absoluta entre el aire a la salida del secador y el aire a la entrada del mismo, es el agua extraída a la madera (kg de agua/kg de aire seco); aplicando la ecuación de estado de los gases perfectos y el caudal del ventilador se obtiene la cantidad de agua extraída por unidad de tiempo en cada instante (g de agua/h). La integral de esta señal proporciona la cantidad total de agua extraída. Al comparar los resultados estimados a lo largo del ciclo con los obtenidos mediante pesada diaria de una muestra representativa de la madera sometida al proceso de secado, se obtiene un coeficiente de correlación de 0,97. El procedimiento está siendo optimizado dado que se emplea el caudal característico del ventilador, aspecto susceptible de ser recalculado para obtener mejores ajustes entre ambas estimaciones. Podría decirse que se ha llegado a un «sensor virtual» para la determinación de la humedad en la madera a partir de los sensores de humedad y temperatura de bajo coste ubicados en distintos puntos del interior del secador. 🌲

- ABU-HAMDEH, N. H.; 2003. Simulation study of solar air heater. *Solar energy*, 74: 309-317.
- AGUILERA, A.; 2007. Evaluación técnica de la durabilidad de palillos separadores en el proceso de secado en cámara de *Pinus Radiata* D. Don. *Maderas. Ciencia y tecnología* 9(1): 85-96.
- ASABE; 2006. Psychrometric Data. ASAE D272.1
- ANANIAS, R. A.; 2005. Estudio de la cinética del secado convencional y bajo vacío del pino radiata. *Maderas. Ciencia y tecnología* 7(1): 37-47.
- ANANIAS, R. A.; VENEGAS, R.; 2005. Secado industrial del pino radiata. Tiempo de esterilización con calor y evolución temporal de la temperatura. *Maderas. Ciencia y tecnología* 7(3): 179-188.
- BAILLE, A.; ILLÁN, F.; MERCADER, J. M.; GONZÁLEZ-REAL, M. M.; 2003. *Diseño y calibración de un sensor de conductancia de capa límite de boja para el control de la ventilación en invernaderos*. Actas del 2º Congreso de la Sociedad Española de AgroIngeniería, 24-27 de septiembre de 2003. Córdoba.
- BAILLE, A.; GONZÁLEZ-REAL, M. M.; MARTÍN, B.; MOLINA, J. M.; ILLÁN, F.; 2006. *Sensor de conductancia de capa límite y de velocidad de aire*. Patente en trámite.
- BENTAYEB, F.; BEKKIOUI, N.; ZEGHMATI, B.; 2008. Modelling and simulation of a word solar dryer in a Moroccan climate. *Renewable Energy*, 33: 501-506.
- BISTONI, A.; 2003. Análisis teórico de un colector solar de aire. *ASADES* 7(1).
- DEDIC, A.; 2001. Simplifying convective heat and mass transfer in moisture desorption of beech wood by introducing characteristic transfer coefficients. *Holz als Roh und Werkstoff*, 58: 96-101.
- GHABA, P.; 2007. Experimental investigation of a solar dryer with natural convective heat flow. *Renewable Energy*, 32: 1817-1829.
- HERRERO, E. J. A.; 2004. *Estudio de tendencias y perspectivas del Sector Forestal en América Latina* - Documento de Trabajo. Informe Nacional Cuba. Dirección Nacional Forestal. Ministerio de la Agricultura de la República de Cuba. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- ITO, S.; 2006. Flow Control and Unsteady-State analysis on thermal performance of solar air collectors. *Transactions of the ASME* 128.
- JANKOWSKY, I. P.; GONÇALVES, L. M.; 2006. *Review of Wood Drying Research in Brazil: 1984-2004*.
- LEIKER, M.; AURICH, K.; 2003. *Sorption behaviour of microwave dried Wood*. 8th International IUFRO Wood Drying Conference.
- PÉREZ, 2005. Estudio de la velocidad del secado de renovables de canelo Drimys Winteri. *Maderas. Ciencia y tecnología* 7(2): 99-108.
- PLUMPTRE, R. A.; JAYANETTI, D. L.; 1996. *Solar heated timber drying kilns*, TRADA Technology Ltd.
- REEB, J. E.; 1997. *Drying Wood*. Cooperative Extension Service. University of Kentucky. College of Agriculture.
- SATTAR, M. A.; 1993. Solar drying of timber – a review. *Holz als Roh-und Werkstoff* 51 409-416.